

# **ESTABILIZACIÓN AEROBICA DE LODOS CON OXIGENO PURO**

**ANASTACIO LÓPEZ ZAVALA**

**ABRIL 1973 314**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

# Estabilización aeróbica de lodos con oxígeno puro

Anastasio López Zavala\*

"Wenn man frische Katstoffe unter Wasser garen lazt, bilden sie zunachst Wassertoff, Kohlensaure und Stinkgase"\*\*\* Con estas palabras se expresaba Karl Imhoff, precursor de la ingeniería sanitaria, cuando era ingeniero en jefe de la Asociación del Ruhr, Essen, Alemania, en el año de 1928 (ref 1)

Esta y otras aseveraciones aún son fundamentales en los procesos del tratamiento de aguas contaminadas, ya que el profesor Imhoff se distinguió, precisamente, por su vasta experiencia práctica en aquel país europeo. Estableció las bases fundamentales de los tanques de sedimentación, analizó el lodo de las aguas negras, determinó el valor agrícola del mismo y estudió su digestión en detalle. Así mismo, diseñó los lechos de secado de lodos, las lagunas de lodos, y la cloración. Llegó a determinar también la naturaleza de los procesos biológicos, entre los cuales incluyó la filtración de arena, filtros rociadores, lodos activados y aireadores de contacto.

Decimos que estos principios aún son fundamentales en la tecnología moderna sanitaria en este último tercio del siglo XX, porque después de 50 años, los procesos y operaciones unitarias que intervienen en el tratamiento de desechos líquidos están basados todavía en tales prácticas, un poco más refinadas, debido al avance en la fabricación de equipo y a ciertos cambios, que son consecuencia de la investigación de laboratorio, principalmente en el aspecto del diseño, pero esencialmente son las mismas prácticas.

La digestión anaeróbica de lodos, según el profesor Imhoff, requería un tiempo de retención de aproximadamente 2 meses a 15 °C, para que alcanzara lo que él denominó el "límite técnico de digestión", o sea el punto en que el lodo se seca fácilmente y no produce olores ofensivos. En la práctica, el proceso de

digestión no se lleva más allá de este límite técnico, que comúnmente se fija cuando se obtiene una reducción de 50 por ciento en el contenido de materia orgánica (sólidos suspendidos volátiles) y alrededor de 75 por ciento de la posible producción de gas obtenible.

Para acelerar el periodo de digestión, es común incrementar la temperatura del lodo. Así, por ejemplo, si a 15 °C la digestión se obtiene (límite técnico) en 2 meses, al aumentar la temperatura a 21 °C, el tiempo se reduce a un mes, y si se incrementa a 27 °C, el periodo de digestión disminuye a 22 días. Este tiempo, en el tratamiento convencional de desechos líquidos, difícilmente es menor de 20 días. Por otro lado, la digestión anaeróbica deja una cantidad considerable de nutrientes de plantas, tales como nitrógeno y fosfato en forma de compuestos solubles, que eventualmente se descargan por el efluente de la planta, ya que, normalmente, el sobrenadante de los digestores regresa al influente. En una investigación reciente (ref 2), se encontró que, si los lodos fueran tratados por un proceso aeróbico, una porción significativa de la materia carbonosa se oxidaría, produciendo bióxido de carbono y agua, y la restante materia carbonosa se asimilaría en protoplasma microbiano. Este proceso fijaría totalmente el nitrógeno y fosfato disponibles, de manera que prácticamente nada permanecería disuelto en el líquido suspendido. Los sólidos acumulados, constituidos en su mayoría por células microbianas, eran fácilmente separados del líquido, dejando un sobrenadante ligeramente coloreado, libre de nutrientes de plantas y muy bajo en demanda química y bioquímica de oxígeno. El proceso completo se efectuó en un tiempo de detención menor de 20 días, lo que contrasta con la digestión anaeróbica, que requiere de 50 a 70 días.

La eutroficación natural de lagos y cuerpos receptores de agua en reposo es el añejamiento gradual o pérdida gradual de la productividad del mismo, con el transcurso de los años. La eutroficación artificial es la

\* Profesor investigador, Facultad de Ingeniería, UNAM

\*\* "Cuando se somete la materia orgánica fresca a un proceso de fermentación, se forman, principalmente hidrógeno, bióxido de carbono y gases malolientes"

producida por el hombre en forma rápida, a través de las descargas de efluentes mal tratados o contaminados, que traen consigo cantidades considerables de nutrientes, los cuales hacen proliferar el crecimiento de las algas, las que al morir disminuyen considerablemente el contenido de oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>) en el cuerpo de agua, así mismo, estas descargas normalmente son altas en demanda bioquímica de oxígeno (DBO), especialmente en nuestro país, por la falta de plantas para el control de la contaminación del agua.

Si se pudieran abatir los valores de las concentraciones de los parámetros indicados en el párrafo anterior a niveles tales que permitieran reducir la eutrofización artificial de los lagos, se daría un buen paso en el control de la contaminación del agua. Por otro lado, si fuera posible disminuir el tiempo de retención del periodo de digestión de los lodos, a niveles en que este proceso resultara ventajoso, desde el punto de vista de la eficiencia de la reducción de la materia orgánica y de la economía, con respecto a los tiempos de retención que se presenten en los procesos convencionales de digestión de lodos, quizá se obtendría una respuesta a la pregunta tradicional acerca de la disposición de los lodos provenientes de las plantas para controlar la contaminación del agua.

A través de la estabilización aeróbica de lodos empleando oxígeno puro, es posible obtener algunos datos interesantes a este respecto, como se indica a continuación.

La estabilización aeróbica de lodos es un método de tratamiento para metabolizar la materia orgánica, puede ser ventajosa con respecto al proceso convencional de digestión anaeróbica. Considerando el mismo porcentaje en la remoción de materia orgánica, el periodo de detención o tiempo de residencia es considerablemente menor mediante el método aeróbico que con el proceso anaeróbico.

En el tratamiento biológico, la oxidación de la materia orgánica tiene lugar mediante la combinación con el oxígeno, para producir la energía necesaria en el proceso. Los carbohidratos, las grasas y proteínas que se encuentran en los efluentes de agua de desecho doméstico son degradados a elementos simples como ácidos volátiles, bióxido de carbono y gases como el hidrógeno, anhídrido sulfuroso, mercaptanos, amoníaco, etc., de aquí el término común "biodegradabilidad", que significa la degradación por medios biológicos (degradable biológicamente).

Para que la oxidación se efectúe, deben cumplirse ciertas condiciones ambientales que balanceen la población de microorganismos, los nutrientes, temperatura, pH, etc. El control de la tasa de oxidación o degradación se obtiene a través de los valores en la producción de gas, tanto en cantidad como en cali-

dad, así como en la producción de sólidos, volátiles y fijos, demanda bioquímica de oxígeno, acidez y pH, ácidos volátiles, grasa, características del lodo, y olor.

En la estabilización aeróbica de materia orgánica, no es posible producir gas metano, precisamente por la presencia de condiciones aeróbicas.

El gas metano sólo se produce bajo condiciones anaeróbicas por las bacterias de metano, la cual se alimenta de los microorganismos saprofitas. Tomando en cuenta esta aseveración, cuando se evalúa la eficiencia de la estabilización aeróbica, ya sea en un sistema de flujo continuo o en uno fijo, la presencia del gas metano es un parámetro que no se señala.

La cinética de la remoción aeróbica de los desechos orgánicos no es simple.

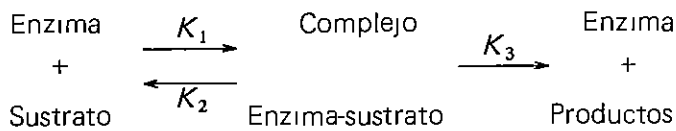
Para llegar a ciertas conclusiones, deben hacerse determinadas suposiciones. Cuando se habla sobre sólidos suspendidos volátiles, se supone que se hace referencia al número total de bacterias que se encuentran en el sistema. Cuando una célula bacteriana se multiplica, se supone que todas sus características o constituyentes se reproducen idénticamente, y, en consecuencia, las concentraciones enzimáticas aumentan en proporción directa al aumento de la masa bacteriana.

Otros factores se consideran básicos para el crecimiento de células en experimentos con flujo continuo y no continuo. Por ejemplo, la demanda bioquímica de oxígeno representa la concentración de sustrato en términos de equivalente de oxígeno. En esta forma, los términos DBO, alimento, material nutriente y sustrato, pueden ser usados indistintamente. Un aumento en la concentración de masa de lodo bacteriano, se toma como directamente proporcional a la cantidad de DBO removida (ref 3).

Todos los demás factores que son de importancia para el crecimiento de las células, requieren también un cuidadoso control. La temperatura deberá conservarse constante a lo largo del experimento.

El pH deberá ser mantenido al nivel óptimo, preferiblemente entre 7.0 y 7.2. Se supone que el medio de desarrollo contiene todos los factores esenciales de crecimiento y que no se encuentran presentes sustancias inhibitorias.

En un sistema fijo, o de flujo no continuo, o de estado quieto, como también se le podría llamar, y de acuerdo con la hipótesis universalmente aceptada de Michaelis-Menten, la reacción entre una enzima pura y un sustrato *in vitro*, es como sigue (ref 4).



Donde

$K_1$  = constante de velocidad de reacción, hacia adelante

$K_2$  = constante de velocidad de reacción, en reversa

$K_3$  = constante de velocidad de reacción

Llamando  $e$ ,  $s$ , y  $c$  a las concentraciones de enzima total, sustrato, y complejo de enzima-sustrato, respectivamente, la velocidad en el cambio,  $dc/dt$ , es

$$\frac{dc}{dt} = K_1 (e - c)s - K_2 c - K_3 c$$

Se considera en esta ecuación que el valor de  $s$  es considerablemente mayor que el de  $e$ . El primer término de esta ecuación es cero en un estado quieto, por tanto

$$0 = K_1 es - K_1 cs - K_2 c - K_3 c$$

$$0 = c (-K_1 s - K_2 - K_3) + K_1 es$$

$$K_1 es = c (K_3 + K_2 + K_1 s)$$

$$c = \frac{es}{\frac{K_3 + K_2}{K_1} + s}$$

La velocidad en la formación del producto,  $v$ , en la reacción enzimática, está dada por  $K_3 c$ .

$$v = K_3 c = \frac{K_3 es}{\frac{K_3 + K_2}{K_1} + s} = \frac{V_s}{K_s + \frac{K_3}{K_1} + s}$$

$$v = \frac{V_s}{K_m + s}$$

Esta es la ecuación de Michaelis-Menten, el término  $K_m$  se llama constante de Michaelis-Menten. En esta ecuación

$eK_3 = v$  = velocidad máxima de producción, todas las enzimas forman el complejo enzima-sustrato

$$K_s = \frac{K_2}{K_1} \quad K_m = K_s + \frac{K_3}{K_1}$$

Si el valor de  $K_3$  es menor que  $K_1$ , es decir, si la velocidad de formación del producto queda controlada por la velocidad específica,  $K_3$ , entonces el valor de  $K_m$  se reduce a  $K_m = K_s$

Esta constante es igual a la de equilibrio,  $K_s$ , solamente cuando el valor de  $K_3 \ll K_1$

Las ecuaciones para el método de Michaelis-Menten son similares a las relaciones básicas propuestas por Monod (ref 5) que definen la relación entre la utilización del nutriente y el crecimiento bacteriano, y la dependencia de la constante de la tasa de crecimiento sobre la concentración del nutriente controlador del crecimiento, respectivamente

Las tasas específicas de crecimiento, formación de producto y consumo de sustrato son una función del tiempo durante la fermentación de estado fijo. Se han definido las curvas que relacionan cada una de las tasas específicas con el tiempo, al que se le llama también tiempo de detención o de residencia

En un estudio efectuado por Keshavan y otros (ref 6), se demostró que la remoción aeróbica de material orgánico sigue dos curvas opuestas: una para sólidos suspendidos volátiles y otra para DBO, ambas relacionadas con el tiempo, en horas, de aireación. Estas curvas quedan representadas en la fig 1

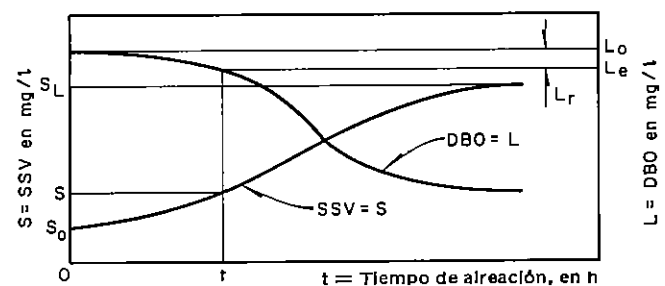


Fig 1

Hay una constante de proporcionalidad,  $a$ , para convertir DBO en concentración equivalente de sólidos suspendidos volátiles, a la relación  $K/a$ , donde  $K$  es la constante de la tasa, se le llama constante de la tasa de crecimiento,  $K_s$ , expresada en  $lt/mg/h$

Una vez desarrollado un proceso matemático, se llega a determinar la ecuación que representa la curva de sólidos suspendidos volátiles y tiempo de aireación (fig 1). La ecuación tiene la forma siguiente

$$S = \frac{S_L}{1 + \frac{(S_L - S_o)}{S_o} e^{-K_s S_L t}} \quad (1)$$

Donde.

$S$  = concentración promedio de células, en mg/l

$S_L$  = concentración límite (máxima) de sólidos suspendidos volátiles, en mg/l

$S_o$  = concentración inicial de SSV al tiempo 0, en mg/l

$t$  = tiempo de aireación, en horas

Según la fig 1, la velocidad de la reacción hacia adelante,  $ds/dt$ , es

$$\frac{ds}{dt} = K_s \dot{L} e$$

Como el incremento en la concentración de SSV es proporcional a la cantidad de DBO removida

$$\Delta S = (S - S_o) = aLr$$

$$S_L - S_o = aL_o$$

Tomando en cuenta que  $Lr = L_o - Le$ , y ordenando estas ecuaciones

$$S_L - S = aLe$$

$$\frac{dS}{dt} = K_s \times S (S_L - S) \quad (2)$$

La integración de esta ecuación, da la ec 1.

Los puntos de inflexión en la curva de crecimiento se tienen cuando  $d^2 S/dt^2 = 0$ .

En el punto de inflexión, el valor de  $S$ , es  $S_L/2$  y el tiempo correspondiente,  $t_i$ , se obtiene sustituyendo  $S_L/2$  por  $S$  en la ec 1.

Entonces

$$t_i = \frac{2.303}{K_s S_L} \log \frac{S_L - S_o}{S_o} \quad (3)$$

El valor de  $K_s$  en la ecuación anterior fue determinado por el autor de este artículo, cuando era candidato al grado de Doctor en Filosofía (ref 7) y, de acuerdo con experimentos efectuados en enero de 1970, tiene el valor siguiente:

$$S_o = 1\,300 \text{ mg/l} \quad S_L = 21\,000 \text{ mg/l}$$

$$T_L = 4.5 \text{ h}$$

$$T_i = 2.25 \text{ h}$$

sustituyendo estos valores en la ec 3:

$$\begin{aligned} 2.25 &= \frac{2.303}{K_s \times 21\,000} \log \frac{21\,000 - 1\,300}{1\,300} = \\ &= \frac{2.303}{K_s \times 21\,000} \log 15.1 \end{aligned}$$

$$2.25 \times K_s \times 21\,000 = 2.303 \times 1.18$$

$$\text{Finalmente, } K_s = 0.736 \times 10^{-4} \text{ litros/mg-h}$$

Tiene de interés puntualizar que el mecanismo cinético explicado con las ecuaciones teóricas indicadas anteriormente, coincide con el proceso de estabilización aeróbica. Sin embargo, más allá de un periodo de aireación correspondiente a 8 horas, los sólidos suspendidos empiezan a decrecer. Este punto tiene ciertas respuestas en estudios hechos en Frankfort, Alemania, donde el tiempo de residencia es en total de 6 horas (ref 8).

En un experimento de estabilización aeróbica de lodos procedentes de los canales de navegación de la bahía de Indiana, cerca de Chicago, Illinois, y usando un volumen total de lodos en el reactor de estado fijo, el autor empleó 35 ml/seg de aire durante 3 días para remover un total de 44 por ciento de sólidos suspendidos volátiles. El experimento se continuó hasta un tiempo de residencia de 5 días, pero no se mejoró la eficiencia en la remoción de materia orgánica. De acuerdo con lo que se ha explicado en párrafos anteriores, sobre la conveniencia de reducir el tiempo de residencia en el reactor de estado fijo, se hicieron varios experimentos empleando oxígeno puro en un 98 por ciento, ya que encontrándose el oxígeno en forma pura podría reducir quizá en una quinta parte el tiempo de residencia, si se toma en cuenta que la proporción de oxígeno en el aire es de aproximadamente 21 por ciento en volumen. Se compararon los resultados de estabilización aeróbica empleando aire y oxígeno puro en un 98 por ciento.

El flujo de aire y de oxígeno fueron regulados con un rotámetro calibrado especialmente, de la marca Miller Creek, la calibración se hizo con ayuda de un medidor de prueba húmeda a temperatura de laboratorio. Las lecturas, para aire y para oxígeno (fig 2), son las siguientes

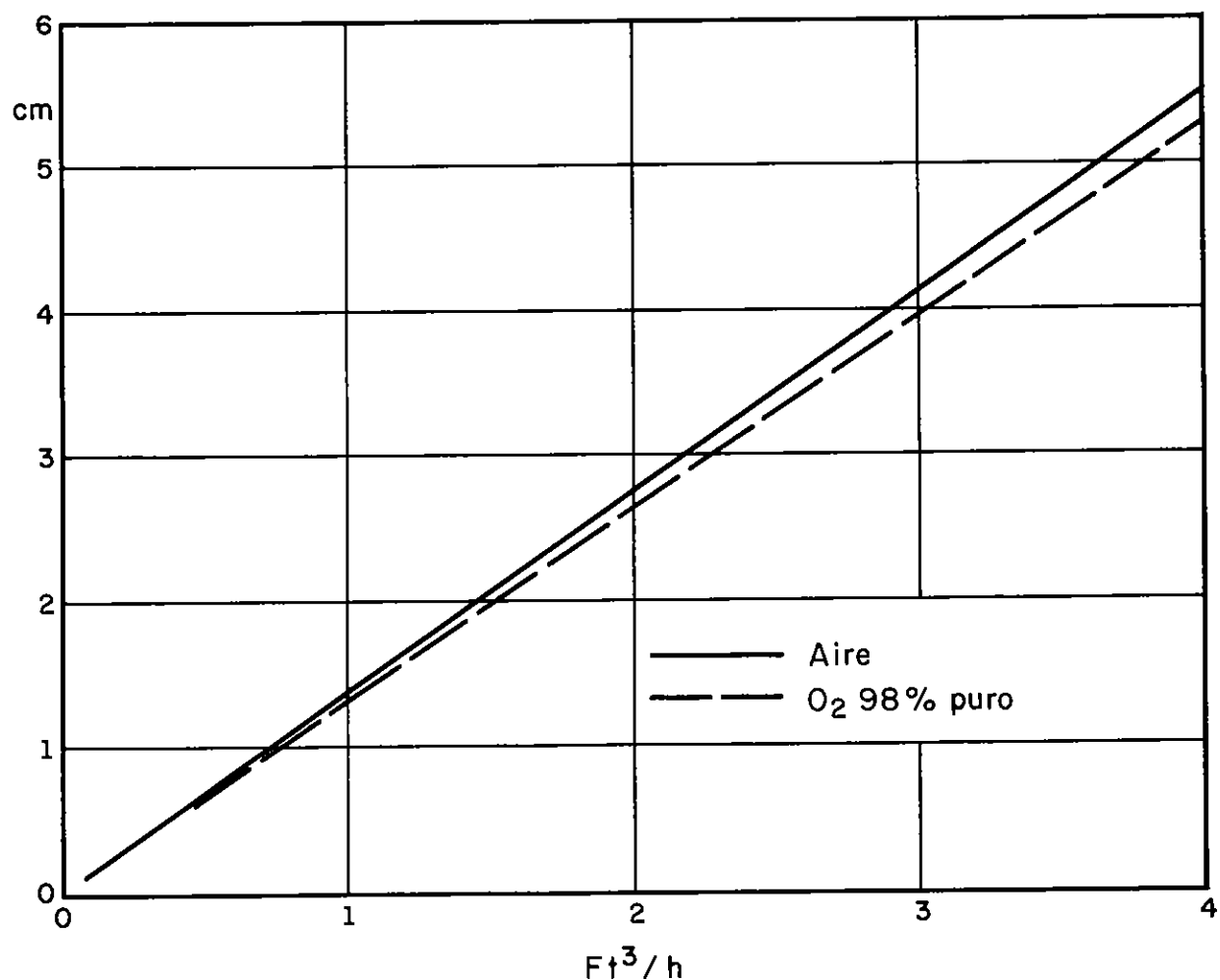


Fig 2. Calibración de los flujos

#### LECTURA EN CM

|         | Esfera vidrio | Esfera metal | Flujo PCH  |
|---------|---------------|--------------|------------|
| aire    | 10.9          | 5.1          | 3.75       |
|         | 10.75         | 5.05         | 3.85       |
|         | 7.1           | 3.5          | 2.65       |
|         | 7.05          | 3.35         | 2.60       |
|         | 2.3           | 1.2          | 0.75       |
|         | <hr/> 4.10    | <hr/> 2.0    | <hr/> 1.52 |
| oxígeno | 4.65          | 2.27         | 1.81       |
|         | 8.65          | 4.0          | 3.10       |
|         | 13.50         | 5.75         | 4.23       |

En la fig 3 se representa, esquemáticamente, la colocación de equipo y aparatos necesarios para llevar a cabo el experimento con oxígeno. La botella de oxígeno se empotró firmemente en la mesa de laboratorio, con ayuda de un cinturón de seguridad. Se han dado casos, en laboratorio, en que, debido a un esca-

pe imprevisto y no controlado del gas, que se encuentra a presión de 2 250 psi, esta botella actúa como cohete de propulsión, con los consiguientes peligros que el lector podrá imaginar.

Como fuente de aire se empleó una compresora trabajando a 8 psi. El diagrama de conexión es exactamente el mismo que se muestra en la fig 3, con la diferencia de la conexión de aire directamente de la válvula de la mesa de laboratorio, sustituyendo a la botella de oxígeno.

Los dos reactores, el que tiene aireación con oxígeno y el que emplea aire, se instalaron simultáneamente, a temperatura de laboratorio, con flujos de aireación de 6.0 PCH\* y 2.0 PCH para aire y oxígeno, simultáneamente. La arena y la grava que contenían los lodos se separaron por decantación durante 15 seg, se inoculó cada reactor con lodo del tanque secundario de la *Northside Sewage Treatment Plant* del *Metropolitan Sanitary District of Greater Chicago*, en una proporción de 500 ml para 2 500 ml de lodo de los sedimentos del canal de la bahía de Indiana. Se aclimató la mezcla por 24 h.

\* PCH = pies cúbicos por hora.

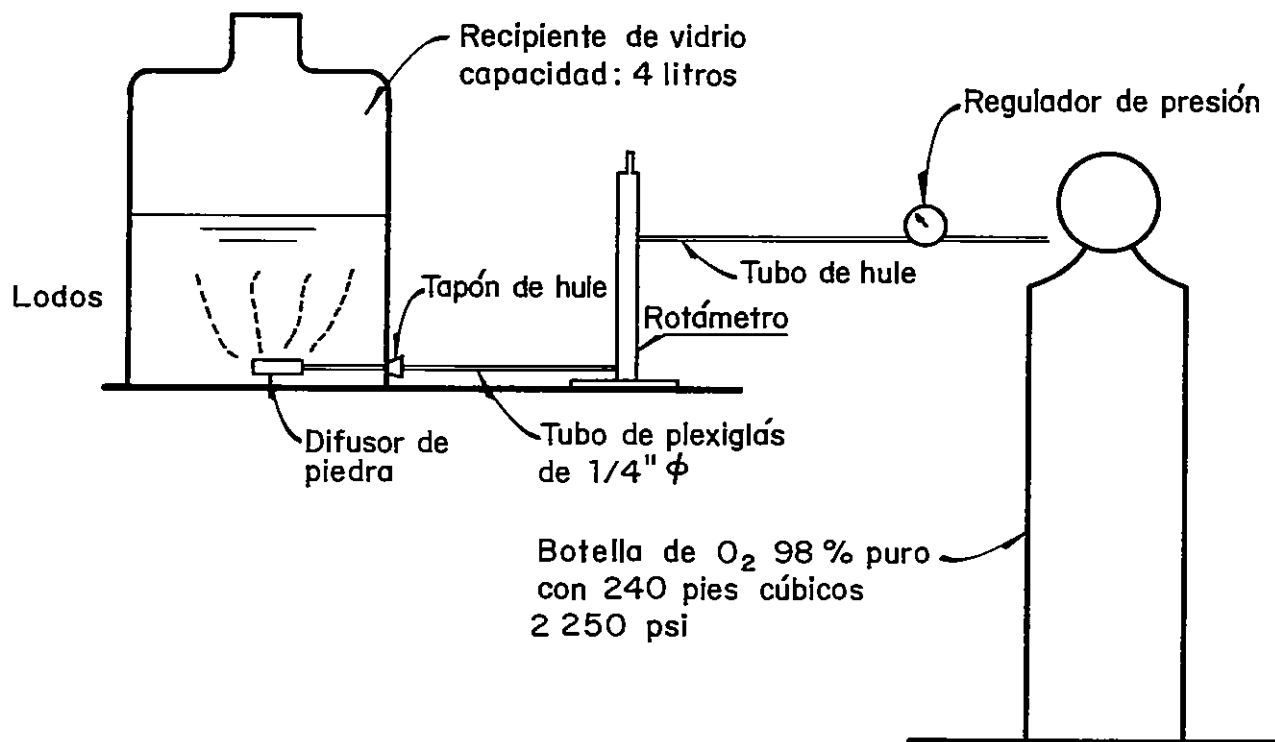


Fig 3.

Esta vez, la estabilización aeróbica de las muestras usando aire y oxígeno con reactores separados, mejoró la biodegradabilidad de materia orgánica. Los sólidos totales se redujeron, al final del tercer día de aireación, en 11 y 22 por ciento para aire y oxígeno, respectivamente. La materia orgánica total se redujo 38 y 37.5 por ciento para aire y oxígeno, los sólidos suspendidos, 48.7 y 54.2 por ciento con aire y oxígeno, y los sólidos volátiles suspendidos indican una reducción de 54 y 50.2 por ciento para aire y oxígeno. La demanda bioquímica de oxígeno se redujo en 69.3 y 80.7 por ciento para aire y oxígeno, respectivamente, y la demanda química de oxígeno se redujo en 93.5 y 97.8 por ciento, respectivamente. El valor de PH permaneció aproximadamente constante, a largo de los tres días de aireación, con un valor de 6.7, igual al de la muestra original.

## DISCUSION

El proceso de digestión de lodos tiene una finalidad principal: estabilizar la acción biológica de la materia orgánica, convirtiendo esta a líquido y gas, haciendo el lodo remanente menos ofensivo y obteniendo una mejor disposición para la acción de secado. Desde los primeros experimentos hechos por el profesor Karl Imhoff, en 1906, en Alemania, la teoría de la digestión de lodos, especialmente en condiciones anaeróbicas, no ha sufrido cambios importantes hasta nuestros días. El tiempo de retención necesario para efectuar el proceso de digestión, para climas templa-

dos, es de 20 a 25 días. Aún hoy es sorprendente ver que este proceso requiere tiempo de detención no menor de 20 días. Muy rara vez es posible tener periodos de detención menores que los indicados, aunque existe literatura científica y técnica que indica la posibilidad de emplear de 3 a 5 días en retención.

Por otro lado, el proceso de estabilización aeróbica, en la actualidad, ha usado periodos de retención que a veces son de hasta 15 días y otras solamente de 5 días. Para la estabilización de lodos bentales del canal de la bahía de Indiana, el proceso de aireación tiene alguna resistencia, por la relativa pequeña cantidad de materia orgánica presente, que varía entre 10 y 30 por ciento. No resultó muy ventajoso experimentar con periodos de aireación de 20 horas, ya que se consiguió solo una reducción de alrededor de 18 por ciento en sólidos suspendidos. Únicamente cuando se extendió la aireación a tres días, se obtuvieron los mejores resultados, usando aire y oxígeno.

Por lo que respecta al flujo de aire, las cantidades teóricas de aire y oxígeno, determinadas por las ecuaciones para sólidos suspendidos, no se aplicaron, pues se observó que esas cantidades no eran suficientes para tener en suspensión los sólidos.

En el caso de la aireación con oxígeno, la cantidad teórica se incrementó, lo que indica que no existe correlación con las fórmulas para lodos activados. En el caso de la aireación con aire, la situación es exactamente la misma. Diferentes valores de flujo fueron

usados a lo largo del experimento. El intervalo de estos valores varía entre 0.5 y 5.0 PCH, para un volumen de lodos de 1.0 a 2.0 litros. Los valores finales de 2.0 PCH, para oxígeno, y 6.0 PCH, para aire, se aceptaron en virtud de los resultados en la remoción de sólidos suspendidos. Esta es una indicación de las consideraciones económicas que deben gobernar el proceso aeróbico. Los consumos de aire y oxígeno están íntimamente ligados a los costos de energía. Los beneficios derivados de la reducción en tiempo de detención deben ser comparados con el incremento en costo de energía al usar mayores flujos de aire. Literatura reciente indica que las necesidades de energía, en el caso de aireación con oxígeno, son menores en comparación con las necesidades de energía en sopladores de aire convencionales (ref 9).

El porcentaje de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, DBO, y DQO (demanda química de oxígeno), en la última parte del experimento, se redujo notablemente, y en algunas ocasiones, dicha reducción fue muy significativa, especialmente usando oxígeno puro en 98 por ciento. Este punto, sin embargo, debe ser tomado con cierta reserva, debido al carácter muy variable de los lodos, según se pudo comprobar en los análisis de laboratorio efectuados durante un año. No hay duda de que los sólidos suspendidos y los sólidos suspendidos volátiles, aumentan con las primeras horas de aireación.

Este punto coincide con la explicación teórica deducida de las curvas de crecimiento, y también comprueba que la estabilización aeróbica se efectúa durante la fase de auto-oxidación o respiración endógena.

## CONCLUSIONES

Del estudio efectuado en muestras tomadas durante un año, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. La degradación biológica de los sedimentos es un hecho comprobado. Los primeros experimentos mostraron una reducción de solamente 18 a 20 por ciento.
2. Se comprobó que el periodo óptimo de detención en el proceso aeróbico para obtener el porcentaje máximo en la remoción de contaminantes orgánicos es de 3 días. Aunque durante algunos experimentos se obtuvieron buenas reducciones al final de 2 días de aireación, se decidió extender este periodo a 3 días, con el propósito principal de obtener reducciones de 98 por ciento en la demanda química de oxígeno.
3. El periodo de aireación de 3 días es aplicable tanto al aire como al oxígeno, siendo necesario un flujo de 6 PCH para el primero y de 2 PCH para el segundo, para una muestra con volumen total de 3.0 litros, en ambos casos.

## COMENTARIOS FINALES

Una vez que el C. Presidente de la República apruebe el nuevo Reglamento para la Prevención y Control de La Contaminación de Aguas,\* tanto la Secretaría de Salubridad y Asistencia como la de Recursos Hidráulicos tendrán la oportunidad de dictar las disposiciones técnicas que deberán cumplir las personas u organizaciones, públicas o privadas, que causen contaminación de las aguas. Es de desearse que, en este aspecto, ambas Secretarías se vean apoyadas por los valores técnicos con los que cuenta nuestro país, en beneficio de nuestro desarrollo y de un mejoramiento ambiental que formen una familia mexicana más sana y más próspera.

\* Apareció el jueves 29 de marzo de 1973 en el Diario Oficial.

## REFERENCIAS

1. K. Imhoff, "**Taschenbuch der Stadtentwässerung**", 22, Verbesserte Auflage, R. Oldenbourg Verlag, Munich, Viena (1969), pág. 204. Traducción de G. M. Fair en "**The Arithmetic of Sewage Treatment Works**", John Wiley and Sons, Inc., Chapman and Hall, Ltd., Londres, pág. 24.
2. R. L. Ingersen y H. O. Halvorson, "**Removal of Plant Nutrients by Means of Aerobic Stabilization of Sludge**", *Applied Microbiology*, Vol. 13, No. 373 (1965).
3. D. B. Smith, "**Aerobic Biological Stabilization of Organic Substrates**", *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 24, No. 9, Washington (1952).
4. F. W. Charles, "**Biochemical Engineering**", D. Van Nostrand Co., Londres (1964).
5. J. Monod, "**The Growth of Bacterial Cultures**", *Annual Review of Microbiology*, Vol. 3, No. 371 (1949).
6. K. Keshavan, V. C. Behn y W. F. Ames, "**Kinetics of Aerobic Removal of Organic Wastes**", *JSED, Procs., ASCE*, No. SA1 (feb. 1964).
7. A. López Zavala, "**The Aerobic Stabilization of Dredged Sediments**", Preliminary Draft Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering, in the Graduate School of Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois (feb. 1971).
8. K. Dietrich, "**Aerobic Sludge Stabilization in Sewage Treatment Plants**", *Journal WPCF*, Abstract II, Munich (mar. 1966).
9. A. A. Kalinske, "**Economic Evaluation of Aerator Systems**", *Environmental Science and Technology*, Vol. 3 (mar. 1969).